

523,252

Rec'd PCT/PTO 26 JAN 2005

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
26. Februar 2004 (26.02.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/017086 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G01R 33/09**,
G01B 7/30

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/002145

(22) Internationales Anmeldedatum:
27. Juni 2003 (27.06.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 34 347.0 26. Juli 2002 (26.07.2002) DE
102 57 253.4 7. Dezember 2002 (07.12.2002) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE]; Postfach 20 02
20, 70442 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **SCHMOLLNGRUBER, Peter** [DE/DE]; Hauffstrasse 6, 71134 Aidlingen (DE). **HERRMANN, Ingo** [DE/DE]; Manosquerstrasse 21, 70771 Leinfelden-Echterdingen (DE). **SIEGLE, Henrik** [DE/DE]; Anne-Frank-Strasse 8, 71229 Leonberg (DE). **KITTEL, Hartmut** [DE/DE]; Oberer Eittlesberg 44, 71287 Weissach-Flacht (DE). **FARBER, Paul** [DE/DE]; Schwabstrasse 38b, 70197 Stuttgart (DE). **MAY, Ulrich** [DE/DE]; Boxgraben 66, 52064 Aachen (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (national): AU, JP, RU, US.

(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

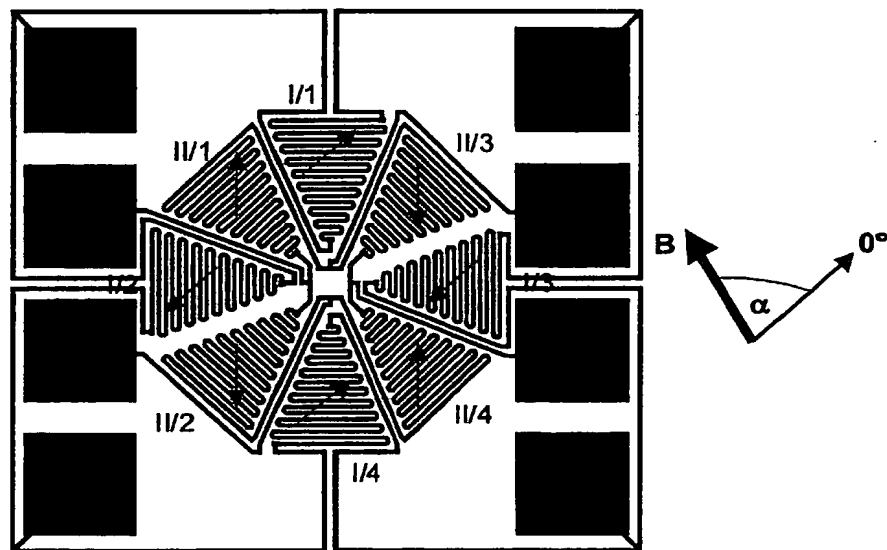
Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: GMR SENSOR ELEMENT AND USE THEREOF

(54) Bezeichnung: GMR-SENSORELEMENT UND DESSEN VERWENDUNG



(57) Abstract: Disclosed is a GMR sensor element comprising a rotationally symmetrical arrangement of eight GMR resistor elements in particular which are interconnected to form two Wheatston full bridges. Said GMR sensor element is particularly suitable for use in an angle sensor for detection of the absolute position of the camshaft or crankshaft in a motor vehicle, especially in a camshaft-free engine with electric or electrohydraulic valve control, a motor position of an electrically commutated motor or detection of a windscreen wiper position or in a steering angle sensor system in motor vehicles.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/017086 A1



Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Es wird ein GMR-Sensorelement mit einer rotationssymmetrischen Anordnung von insbesondere acht GMR-Widerstandselementen vorgeschlagen, die zu zwei Wheatston'schen Vollbrücken miteinander verschaltet sind. Dieses GMR-Sensorelement eignet sich besonders zum Einsatz in einem Winkelsensor zur Detektion der Absolutposition der Nockenwelle oder der Kurbelwelle in einem Kraftfahrzeug, insbesondere bei einem nokkenwellenfreien Motor mit elektrischer oder elektrohydraulischer Ventilsteuerung, einer Motorlage eines elektrisch kommutierten Motors oder einer Detektion einer Scheibenwischerstellung, oder in der Lenkwinkelsensorik in Kraftfahrzeugen.

GMR-Sensorelement und dessen Verwendung

Die Erfindung betrifft ein GMR-Sensorelement nach dem Hauptanspruch sowie dessen Verwendung.

Stand der Technik

Der Giant Magneto-Resistive Effekt (GMR-Effekt) lässt sich in Form sogenannter Spin-Valve-Strukturen (Spin-Ventile oder "Spin-Valves") für die Winkelsensierung nutzen. Dies ist beispielsweise in WO 00/79298 oder in EP 0 905 523 A2 beschrieben.

GMR-Spin-Valves bestehen im Kern aus zwei ferromagnetischen Dünnschichten mit einer resultierenden Magnetisierung m_1 bzw. m_2 , die durch eine dazwischen liegende, nicht magnetische Dünnschicht voneinander getrennt sind. Der elektrische Widerstand $R(\alpha)$ eines solchen Schichtsystems zeigt dann cosinusförmige Abhängigkeit von dem Winkel α zwischen der Richtung der Magnetisierung m_1 und der Richtung der Magnetisierung m_2 der Art:

$$R(\alpha) = \bar{R} - 0,5 \cdot \Delta R_{GMR} \cdot \cos(\alpha) .$$

Die maximale relative Widerstandsänderung $\Delta R_{GMR} / \bar{R}$ bezeichnet dabei GMR-Effekt und beträgt typischerweise 5 % bis 15%.

GMR-Spin-Valve-Schichtsysteme werden im Übrigen meist mittels Kathodenzerstäubung der jeweiligen Materialien abgeschieden, und dann mittels üblicher Photolithographieverfahren und Ätztechniken strukturiert.

Wesentlich für die beabsichtigte Spin-Valve-Funktion ist eine starre, durch ein von Außen auf das Schichtsystem einwirkendes Magnetfeld, das insbesondere hinsichtlich seiner Richtung und/oder Stärke detektiert werden soll, zumindest näherungsweise nicht veränderbare Richtung der Magnetisierung m_1 der ersten ferromagnetischen Schicht, des sog. Reference Layer (RL) oder Referenzschicht, und eine sich leicht zumindest näherungsweise parallel zu dem äußeren Magnetfeld orientierende Richtung der Magnetisierung m_2 der zweiten ferromagnetischen Schicht, des sog. Free Layer (FL) oder Detektionsschicht. Um beides zu erreichen, werden zum einen die beiden ferromagnetischen Schichten durch eine ausreichende Dicke der nichtmagnetischen Zwischenschicht, des sogenannten Non-Magnetic Layer (NML), von typischerweise einigen Nanometern magnetisch entkoppelt, und die Magnetisierung der Referenzschicht (RL) z.B. durch eine zusätzliche, direkt benachbarte antiferromagnetische Schicht, einen sogenannten natürlichen Antiferromagneten (AF), und deren gegenseitige magnetische Kopplung durch Austauschwechselwirkung fixiert ("gepinnt").

Dies ist schematisch in Figur 1a dargestellt, wo das GMR-Schichtsystem oder GMR-Sensorelement unter dem Einfluss eines Magnetfeldes eines Gebermagneten steht.

Eine weiter verbesserte Stabilisierung der Referenzmagnetisierung erzielt man durch Hinzufügen eines zusätzlichen sogenannten synthetischen oder "künstlichen" Antiferromagneten (SAF). Dieser SAF besteht entsprechend Figur 1b aus zwei ferromagnetischen, über eine nichtmagnetische Zwischenschicht stark antiferromagnetisch gekoppelten Schichten. Diejenige dieser beiden ferromagnetischen Schichten, die direkt neben bzw. auf dem natürlichen Antiferromagneten AF liegt, wird als Pinned Layer (PL) bezeichnet, da ihre Magnetisierung M_p infolge der Kopplung an den natürlichen Antiferromagnet (AF) fixiert ("gepinnt") wird. Die zweite ferromagnetische Schicht des SAF, deren Magnetisierung M_R derjenigen des Pinned Layer (PL) infolge der antiferromagnetischen Kopplung entgegengesetzt orientiert ist, dient als Referenzschicht (RL) für das oben bereits beschriebene GMR-Spin-Valve-Schichtsystem.

Um das winkelabhängige Nutzsignal zu extrahieren, werden bei einem GMR-Sensorelement gemäß dem Stand der Technik vier Spin-Valve-Widerstandselemente z. B. mittels Aluminium-Dünnschichtleiterbahnen zu einer Wheatstone'schen Brücken-

schaltung (Wheatstone-Vollbrücke) zusammengeschaltet. Die maximale Signalamplitude erhält man bei entsprechend Figur 2 entgegengesetzt orientierten Referenzmagnetisierungen M_R der Brückenwiderstände innerhalb der Halbbrücken und gleich orientierten Referenzmagnetisierungen M_R der in der Vollbrücke diagonal liegenden Widerstände.

Ein GMR-Winkelsensor besitzt in der Regel noch eine zweite Vollbrücke aus GMR-Widerständen, deren Referenzrichtungen, wie in Figur 2 gezeigt, relativ zu denen der ersten Vollbrücke um 90° verdreht sind. Das von der zweiten Vollbrücke bereitgestellte Signal U_{\sin} ist dadurch relativ zu dem Signal der ersten Vollbrücke U_{\cos} um 90° phasenverschoben.

Durch Arcustangensbildung bzw. dementsprechende Algorithmen (z.B. CORDIC-Algorithmus) wird dann aus den beiden cosinus- bzw. sinusförmigen Brückensignalen U_{\sin} , U_{\cos} der über eine volle 360° -Umdrehung eindeutige Winkel α zu der Richtung eines äußeren Magnetfeldes B bestimmt.

Die unterschiedlichen Referenz-Magnetisierungsrichtungen gemäß Figur 2 werden z.B. dadurch realisiert, dass die einzelnen GMR-Brückenwiderstände lokal auf eine Temperatur T oberhalb der Blockingtemperatur (Néel-Temperatur) der antiferromagnetischen Schicht (AF) jedoch unterhalb der Curie-Temperatur der ferromagnetischen Schichten (PL, RL) gemäß Fig. 1a bzw. Fig. 1b erhitzt werden, so dass die antiferromagnetische Spin-Ordnung in der antiferromagnetischen Schicht aufgehoben wird, und danach in einem äußeren Magnetfeld geeigneter Feldrichtung abgekühlt werden. Bei dem dabei erfolgenden erneuten Ausbilden der antiferromagnetischen Ordnung wird die aus der Austauschwechselwirkung an der Grenzfläche von antiferromagnetischer Schicht (AF) und benachbarter ferromagnetischer Schicht (PL) resultierende Spin-Konfiguration eingefroren. Folglich wird die Richtung der Magnetisierung der benachbarten ferromagnetischen Schicht (Pinned Layer PL) fixiert. Das lokale Aufheizen der GMR-Brückenwiderstände kann z.B. mittels eines kurzen Laser- oder Strompulses erfolgen. Der Strompuls kann dabei direkt durch die GMR-Leiterstruktur oder/und einen zusätzlichen Heizleiter getrieben werden.

Bei bekannten GMR-Winkelsensoren wird die Referenzmagnetisierung M_R der einzelnen Brückenwiderstände entweder parallel oder senkrecht zu der Richtung der streifenförmig

strukturierten GMR-Widerstandselemente gewählt. Dies dient dazu, den Einfluss der Formanisotropie gering zu halten. Weiterhin werden die streifenförmig strukturierten GMR-Widerstandselemente innerhalb einer Vollbrücke gemäß Fig. 2 bevorzugt parallel ausgerichtet. Dies dient der Unterdrückung eines Signalbeitrags aufgrund eines überlagerten Anisotrop-Magnetoresistiven Effekts (AMR-Effekt). Der AMR-Signalbeitrag beruht dabei auf einer Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von dem Winkel α zwischen der Strom- und der Magnetisierungsrichtung der Form:

$$R(\vartheta) = \bar{R} + 0,5 \cdot \Delta R_{AMR} \cdot \cos(2 \cdot \vartheta)$$

Werden dagegen die GMR-Widerstände innerhalb einer Halbbrücke mit orthogonaler Ausrichtung ihrer GMR-Streifen realisiert, wie dies beispielsweise in Figur 10 in WO 00/79298 der Fall ist, dann wird der AMR-Signalbeitrag sogar maximal begünstigt. Das wirkt sich verschlechternd auf die Winkelgenauigkeit des GMR-Winkelsensors aus.

Vorteile der Erfindung

Aus den genannten Gründen weisen daher bekannte GMR-Winkelsensoren keine rotationssymmetrische Anordnung der Brückenwiderstände auf. Beide Vollbrücken sind vielmehr üblicherweise lateral nebeneinander angeordnet. Dadurch ergibt sich als Folge der fehlenden Rotationssymmetrie eine erhöhte Empfindlichkeit bekannter Sensoren bezüglich der Richtungsinhomogenität des Geberfeldes, d.h. des von Außen einwirkenden Magnetfeldes, sowie bezüglich Temperaturgradienten.

Dadurch, dass bei bekannten GMR-Winkelsensoren die Pinning- bzw. Referenzrichtung innerhalb eines Brückenwiderstandes stets einen festen Winkel zur Streifenrichtung aufweist, bieten diese Sensoren weiter nicht die Möglichkeit, formanisotropiebedingte Einflüsse auf das Pinningverhalten und diesbezügliche Nachteile auf die Winkelsensierungsgenauigkeit auszugleichen.

Für einen 360° erfassenden Winkelsensor ist eine Rotationssymmetrie im Sensordesign hingegen sehr vorteilhaft, um nicht bereits durch eine Unsymmetrie in der Anordnung der einzelnen GMR-Widerstandselemente zusätzliche richtungsabhängige Winkelfehlerbeiträge zu erhalten.

Durch die erfindungsgemäße, rotationssymmetrische Anordnung der GMR-Widerstandselemente in den beiden Wheatstone-Brücken wird daher sowohl eine reduzierte Empfindlichkeit gegenüber Feldrichtungs- und Temperaturinhomogenitäten erreicht, als auch ein unerwünschter AMR-Signalbeitrag unterdrückt und weiterhin der Formanisotropie-Einfluss auf das Pinningverhalten und die Winkelsensierungsgenauigkeit des GMR-Sensorelementes reduziert.

Besonders vorteilhaft ist weiter, wenn neben der rotationssymmetrischen Anordnung der GMR-Widerstandselemente in den beiden Wheatstone-Brücken eine ineinander verschachtelte Anordnung dieser Widerstände gewählt wird. Dies führt zu einer weiter reduzierten Empfindlichkeit gegenüber Feldrichtungs- und Temperaturinhomogenitäten.

Die Unterdrückung des störenden AMR-Signalbeitrags wird durch eine zusätzliche Aufteilung eines jeden einzelnen GMR-Brückenwiderstandselementes in zwei gleiche Hälften oder Teilbrückenwiderstände mit orthogonal zu einander orientierten GMR-Streifenrichtungen erreicht. Dies führt insbesondere auch zu einer Erhöhung der Winkelmessgenauigkeit. Vorteilhaft ist in diesem Zusammenhang weiter, dass sich dadurch, dass die Richtung der streifenförmig strukturierten GMR-Widerstandselemente ("GMR-Streifenrichtung") bei jeweils einem der beiden Teilbrückenwiderstände parallel und bei dem jeweils anderen Teilbrückenwiderstand senkrecht zur Pinning- bzw. Referenzrichtung gewählt wird, eine Mittelung des Einflusses von zur Streifenrichtung paralleler und senkrechter Pinningrichtungen innerhalb eines jeden der GMR-Brückenwiderstandselemente einstellt. Das Pinningverhalten ist dann wiederum für alle zweiteiligen GMR-Brückenwiderstandselemente identisch (Mittelung über jeweils beide Teile). In diesem Fall weisen die beiden Brückenausgangssignale U_1 , U_2 zudem vorteilhaft zueinander eine 45°-Phasenverschiebung auf.

Falls die GMR-Widerstandselemente eine Pinning- bzw. Referenzrichtung aufweisen, die zumindest näherungsweise unter 45° zu der Richtung der streifenförmig strukturierten GMR-Widerstandselemente gewählt ist, führt dies vorteilhaft zu einem identischen Pinningverhalten der einzelnen GMR-Widerstandselemente, d.h. insbesondere zu einer verbesserten Signalstabilität und Langzeitstabilität des GMR-Sensorelementes. In diesem

Fall besitzen die beiden Brückenausgangssignale U_1 , U_2 zudem zueinander eine 45° -Phasenverschiebung.

Um einen beliebigen Winkel φ gegeneinander phasenverschobenen Brückenausgangssignale U_1 , U_2 , wobei φ bevorzugt 45° ist oder um 45° liegt, können schließlich vorteilhaft durch eine Koordinatentransformation auf orthogonale Signale mit 90° -Phasenverschiebung abgebildet werden. Aus letzteren kann dann durch Arcustangensbildung bzw. einen entsprechenden Algorithmus, beispielsweise den CORDIC-Algorithmus, der gesuchte Winkel α zu der Richtung des äußeren Magnetfeldes B bestimmt werden.

Die Koordinatentransformation bietet darüber hinaus den Vorteil, dass herstellungsbedingte Schwankungen der Phasendifferenz der beiden Brückenausssignale U_1 , U_2 bei der Abbildung auf die orthogonalen Signale kompensierbar sind.

Zeichnungen

Es zeigt Figur 1a einen vereinfachten GMR-Spinvalve-Schichtaufbau mit zwei ferromagnetischen Schichten RL und FL mit den Magnetisierungen m_1 und m_2 , einer nichtmagnetischen Zwischenschicht NML sowie einer antiferromagnetischen Schicht AF. Letztere dient zum Fixieren (Pinnen) der Referenzmagnetisierung m_1 . Daneben ist ein Gebermagnet zur Erzeugung eines äußeren Magnetfeldes B vorgesehen. Der Winkel α bezeichnet den Winkel zwischen Feld- bzw. Magnetisierungsrichtung der freien ferromagnetischen Schicht (FL) und damit auch der Richtung des äußeren Magnetfeldes B in der Ebene des GMR-Sensorelementes und der Referenzmagnetisierungsrichtung.

Die Figur 1b zeigt ein GMR-Spinvalve-Schichtsystem mit einem natürlichen Antiferromagneten AF und einem zusätzlichen synthetischen Antiferromagneten SAF sowie einer weiteren nichtmagnetischen Zwischenschicht NML und einer ferromagnetischen freien Schicht FL.

Die Figur 2 zeigt ein Ersatzschaltbild für ein Winkelsensorelement auf der Grundlage des GMR-Effektes mit zwei Vollbrücken (Wheatstone'schen Brückenschaltungen), wobei die Referenzmagnetisierungen M_R innerhalb der beiden Brücken paarweise entgegengesetzt orientiert und von Brücke zu Brücke um 90° gegeneinander verdreht sind. Die Richtung der Referenzmagnetisierung M_R ist weiter parallel oder senkrecht zu der Richtung der

einzelnen, streifenförmig strukturierten GMR-Widerstandselemente, die beispielsweise gemäß Figur 1a oder Figur 1b aufgebaut sind. Diese "Streifenrichtung" wird durch die angedeutete Streifenschar innerhalb der einzelnen GMR-Widerstandselemente repräsentiert. Daneben ist in Figur 2 die Richtung eines äußeren Magnetfeldes B angegeben, das mit einer Referenzrichtung den mit dem GMR-Sensorelement zu messenden Winkel α einschließt. Die Referenz- oder Nullrichtung wird dabei durch die Wahl der Referenzmagnetisierungsrichtungen in den beiden Vollbrücken definiert, von denen eine als sin-Vollbrücke und eine als cos-Vollbrücke ausgebildet ist.

Die Figur 3 zeigt eine rotationssymmetrische Anordnung mäandrierender, ineinander verschachtelter GMR-Brückenwiderstandselemente I/1 bis I/4 (Brücke I) und II/1 bis II/4 (Brücke II). Dabei sind die Richtungen der Referenzmagnetisierung (siehe eingetragene Pfeile in Figur 3) in Brücke I jeweils unter 45° zur Richtung der einzelnen, streifenförmig strukturierten GMR-Widerstandselemente orientiert, und die Referenzmagnetisierungsrichtungen in Brücke II jeweils um 45° gegenüber denjenigen in Brücke I gedreht. Daneben ist in Figur 3 die Richtung eines äußeren Magnetfeldes B angegeben, das mit einer Referenzrichtung den mit dem GMR-Sensorelement zu messenden Winkel α einschließt. Die Referenz- oder Nullrichtung ist dabei durch die Wahl der Referenzmagnetisierungsrichtungen in Brücke I und Brücke II definiert, wobei die Brücke I einen cosinusförmigen Signalverlauf über den Winkel α liefern soll.

Die Figur 4 zeigt ein Ersatzschaltbild zu dem Layout des GMR-Sensorelement gemäß Figur 3. Die Pinning- bzw. Referenzmagnetisierungsrichtung M_R ist dabei jeweils unter 45° zur GMR-Streifenrichtung, die erneut analog Figur 2 durch die innerhalb der einzelnen GMR-Widerstandselemente eingezeichnete Streifenschar angegeben ist, orientiert, und in Brücke II zusätzlich um 45° gegenüber derjenigen in Brücke I gedreht. Es ergibt sich eine Verstärkung des AMR-Signalbeitrags infolge zueinander orthogonaler Streifenrichtungen der Widerstände jeder Halbbrücke.

Die Figur 5a zeigt GMR-Sensorausgangssignale U_1 und U_2 mit 45° -Phasenunterschied gemäß einer Pinning- bzw. Referenzmagnetisierungsrichtung M_R unter 45° zur Streifenrichtung entsprechend Figur 3 bzw. 4. Die Figur 5b zeigt entsprechend transformierte, zueinander orthogonale GMR-Sensorsignale U_{\cos} und U_{\sin} mit 90° -Phasenunterschied. Der AMR-Signalbeitrag ist in Figur 5a und Figur 5b nicht dargestellt. Auf der x-Achse

ist in Figur 5a bzw. Figur 5b jeweils die Richtung des äußeren Magnetfeldes B in Grad, d.h. der Winkel α , aufgetragen, während auf der y-Achse bei Figur 5a das GMR-Sensorausgangssignal in mVolt/Volt und bei Figur 5b das transformierte GMR-Sensorsignal in mVolt/Volt aufgetragen ist.

Die Figur 6 zeigt eine rotationssymmetrische, zumindest näherungsweise kreisförmige oder achteckige, ineinander verschachtelte Anordnung mäandrierender GMR-Brückenwiderstandselemente, wobei eine Unterdrückung des AMR-Signalbeitrags durch Aufteilung eines jeden der einzelnen Brückenwiderstandselemente in zwei gleiche Hälften mit zueinander orthogonaler Streifenrichtungen vorgenommen wurde.

Die Figur 7 zeigt ein Ersatzschaltbild zu dem Layout der GMR-Widerstandselemente gemäß Figur 6. Eine Unterdrückung des AMR-Signalbeitrags wird hier durch Aufteilung jedes Brückenwiderstandselementes $I/1, I/2$ bis $II/4$ in zwei Hälften a und b mit zueinander orthogonalen GMR-Streifenrichtungen erreicht. Die jeweilige Pinning- bzw. Referenzmagnetisierung M_R ist unter 45° zur jeweiligen GMR-Streifenrichtung orientiert. Letztere wird durch die innerhalb der einzelnen GMR-Widerstandselemente eingezeichnete Streifenschar angegeben.

Die Figur 8 zeigt ein Ersatzschaltbild zu dem Layout der GMR-Widerstandselemente gemäß Figur 6 mit zu Figur 7 alternativen Pinning- bzw. Referenzmagnetisierungsrichtungen M_R unter 0° und 90° zur GMR-Streifenrichtung bei jedem der einzelnen Brückenwiderstände $I/1, I/2$ bis $I/4$. Eine Mittelung des Einflusses der Pinningrichtung erfolgt hier durch zur GMR-Streifenrichtung sowohl parallele als auch senkrechte Pinning- bzw. Referenzmagnetisierungsrichtung innerhalb jedes zweiteiligen Brückenwiderstandes $I/1, I/2$ bis $I/4$.

Ausführungsbeispiele

a.) rotationssymmetrische Anordnung

Die Figur 3 zeigt eine mögliche rotationssymmetrische Anordnung von insgesamt acht Brückenwiderstandselementen zweier Vollbrücken (Wheatstone-Brücken). Im Gegensatz zu AMR-Sensoren, bei denen die Referenzrichtung durch die Stromrichtung, die durch

die Streifenrichtung definiert wird, gegeben ist, wird bei dem GMR-Winkelsensor die Referenzrichtung durch die Richtung der Magnetisierung der Referenzschicht (RL) definiert. Prinzipiell kann die Pinning- bzw. Referenzrichtung dabei beliebig gewählt werden, um jedoch bei allen Brückenwiderstandselementen das selbe Pinningverhalten zu erhalten, wird hier eine Orientierung der Pinning- bzw. Referenzrichtung unter 45° zur Streifenrichtung gewählt. Verdeutlicht wird dies weiter in Figur 4, wo neben der Streifenrichtung (Streifenschar innerhalb der Widerstandssymbole) auch die Richtung der Referenzmagnetisierung M_R angegeben ist.

b.) Abbildung auf orthogonale Signale

Im Fall einer Pinningrichtung oder Richtung der Referenzmagnetisierung unter 45° zur GMR-Streifenrichtung weisen die beiden Brückenausgangssignale U_1 und U_2 gemäß Figur 5a nicht die übliche Phasenverschiebung von 90°, sondern nur eine 45°-Phasenverschiebung auf. Diese Signale U_1 , U_2 können jedoch auf einfache Weise auf die orthogonalen, cosinus- und sinusförmigen Signale gemäß Figur 5b transformiert werden. Hierzu wird in einer Sensor-Auswertelektronik folgende Transformation durchgeführt:

$$\begin{pmatrix} U_{\cos} \\ U_{\sin} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos(\varphi) & -1 \\ \sin(\varphi) & \sin(\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1 \\ \frac{U_1 \cdot \cos(\varphi) - U_2}{\sin(\varphi)} \end{pmatrix}$$

Hierbei bezeichnet φ die Phasenverschiebung des zweiten Brückensignals relativ zu dem ersten Brückensignal. Diese Phasenverschiebung kann prinzipiell beliebig gewählt werden, es wird jedoch bevorzugt eine Phasenverschiebung von 45° eingestellt.

Aus den mittels dieser Transformation erhaltenen cosinus- und sinusförmigen Signalen gemäß Figur 5b kann durch Arcustangens-Bildung bzw. durch Anwendung eines entsprechenden Algorithmus wie z.B. des CORDIC-Algorithmus in der Sensor-Auswertelektronik der Winkel α bestimmt werden:

$$\alpha_{\text{mess}} = \arctan\left(\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}\right)$$

Die Implementation dieser Koordinatentransformation bietet weiter den wichtigen Vorteil, dass herstellungsbedingte Schwankungen der Phasenverschiebung der beiden Brückensignale U_1 , U_2 sensorspezifisch bei der Abbildung auf orthogonale Signale (90°-Phasenverschiebung) erfasst und kompensiert werden können. Dazu wird beispielsweise bei einem Offset- und Amplitudenabgleich der Signale U_1 , U_2 am Ende einer Produktionslinie auch diese Phasenverschiebung φ beispielsweise mittels Fourieranalyse der beiden Brückensignale U_1 , U_2 bestimmt, und in der Sensor-Auswerteelektronik gespeichert.

c.) rotationssymmetrische Anordnung mit Unterdrückung des AMR-Signalbeitrags

Die in Figur 3 dargestellte Widerstandsanordnung begünstigt den AMR-Signalbeitrag, da die GMR-Streifenrichtungen der beiden Brückenwiderstände einer jeden Halbbrücke orthogonal zu einander stehen. Dieser Nachteil kann vermieden werden, indem man gemäß der bevorzugten, ebenfalls rotationssymmetrischen Anordnung gemäß Figur 6 jeden Brückenwiderstand aus zwei gleichen Hälften mit senkrecht zueinander stehenden GMR-Streifenrichtungen zusammensetzt. Durch die Reihenschaltung der beiden Teilwiderstände mit jeweils identischer Referenzmagnetisierung M_R wird dann der AMR-Anteil herausgefiltert, während der GMR-Signalanteil infolge bei beiden Teilwiderständen identischer Richtung der Referenzmagnetisierung M_R unverändert bleibt. Verdeutlicht wird dieser Sachverhalt durch folgende Beziehung für ein zweiteiliges GMR-Brückenwiderstandselement:

$$\begin{aligned}
 R(\alpha) &= \frac{1}{2} \cdot \underbrace{\left(\bar{R} - 0,5 \cdot \Delta R_{GMR} \cdot \cos(\alpha) + 0,5 \cdot \Delta R_{AMR} \cdot \cos(2\vartheta) \right)}_{1. \text{ Teilwiders tan } d} \\
 &+ \frac{1}{2} \cdot \underbrace{\left(\bar{R} - 0,5 \cdot \Delta R_{GMR} \cdot \cos(\alpha) + 0,5 \cdot \Delta R_{AMR} \cdot \cos(2(\vartheta - 90^\circ)) \right)}_{2. \text{ Teilwiders tan } d} \\
 &= \bar{R} - 0,5 \cdot \Delta R_{GMR} \cdot \cos(\alpha)
 \end{aligned}$$

Hierbei bezeichnet α den Winkel zwischen Feld- bzw. Magnetisierungsrichtung der freien ferromagnetischen Schicht (FL) und der Referenzmagnetisierungsrichtung; ϑ bezeichnet den Winkel zwischen Feld- bzw. Magnetisierungsrichtung der freien Schicht

(FL) und der GMR-Streifenrichtung des ersten Teilwiderstands. Die Streifenrichtung des zweiten Teilwiderstands ist um -90° zu der des ersten Teilwiderstands gedreht.

d.) Pinningverhalten

Die Figur 7 verdeutlicht die Aufteilung der Brückenwiderstände in jeweils zwei Hälften mit zueinander orthogonalen Streifenrichtungen jedoch identischer Referenzmagnetisierungsrichtung M_R . Prinzipiell kann die Pinningrichtung bzw. die Richtung der Referenzmagnetisierung M_R beliebig gewählt werden. Bevorzugt ist jedoch ein Winkel von 45° zur jeweiligen Streifenrichtung, denn dadurch wird für alle Teilwiderstände ein identisches Pinningverhalten erreicht.

Alternativ kann auch eine Pinningrichtung oder eine Richtung der Referenzmagnetisierung M_R eingestellt werden, die bei jeweils einem der beiden Teilwiderstände parallel zur Streifenrichtung und bei dem jeweils anderen Teilwiderstand senkrecht zur Streifenrichtung orientiert ist. Dadurch wird zwar bei den einzelnen Teilwiderständen ein unterschiedliches, jedoch bei jedem der Brückenwiderstandselemente in Form einer Reihenschaltung der beiden Teilwiderstände insgesamt wiederum ein identisches Pinningverhalten erreicht.

Diese Wahl der Pinning- bzw. Referenzmagnetisierungsrichtung bietet gegenüber bekannten Sensoren den Vorteil, das innerhalb eines jeden Brückenwiderstandselementes über das unterschiedliche Pinningverhalten von paralleler und senkrechter Ausrichtung der Pinning- bzw. Referenzmagnetisierungsrichtung zur GMR-Streifenrichtung gemittelt wird.

Der beschriebene 360° GMR-Winkelsensor eignet sich besonders zur Detektion der Absolutposition der Nockenwelle oder der Kurbelwelle in einem Kraftfahrzeug, insbesondere bei einem nockenwellenfreien Motor mit elektrischer oder elektrohydraulischer Ventilsteuerung, einer Motorlage eines elektrisch kommutierten Motors oder einer Detektion einer Scheibenwischerstellung, oder in der Lenkwinkelsensorik in Kraftfahrzeugen.

Patentansprüche

1. GMR-Sensorelement mit einer rotationssymmetrischen Anordnung von insbesondere acht GMR-Widerstandselementen, die zu zwei Wheatston'schen Vollbrücken miteinander verschaltet sind.
2. GMR-Sensorelement nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die GMR-Widerstandselemente ineinander verschachtelt sind.
3. GMR-Sensorelement nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die GMR-Widerstandselemente streifenförmig strukturiert sind.
4. GMR-Sensorelement nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass jedes GMR-Widerstandselement der Wheatston'schen Vollbrücken in zwei gleich aufgebaute Hälften mit orthogonal zu einander orientierten Richtungen der streifenförmig strukturierten GMR-Widerstandselemente unterteilt ist.
5. GMR-Sensorelement nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass damit eine eindeutige Messung eines Winkels (α) eines äußeren Magnetfeldes (B) gegenüber einer Richtung der Magnetisierung einer Referenzschicht (RL) über 360° durchführbar ist.
6. GMR-Sensorelement nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die GMR-Widerstandselemente zumindest näherungsweise kreisförmig oder achteckförmig angeordnet sind.
7. Verwendung eines GMR-Sensorelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche in einem Winkelsensor zur Detektion der Absolutposition einer Nockenwelle oder einer Kur-

belwelle in einem Kraftfahrzeug, insbesondere bei einem nockenwellenfreien Motor mit elektrischer oder elektrohydraulischer Ventilsteuerung, einer Motorlage eines elektrisch kommutierten Motors oder einer Detektion einer Scheibenwischerstellung, oder in der Lenkwinkelsensorik in Kraftfahrzeugen.

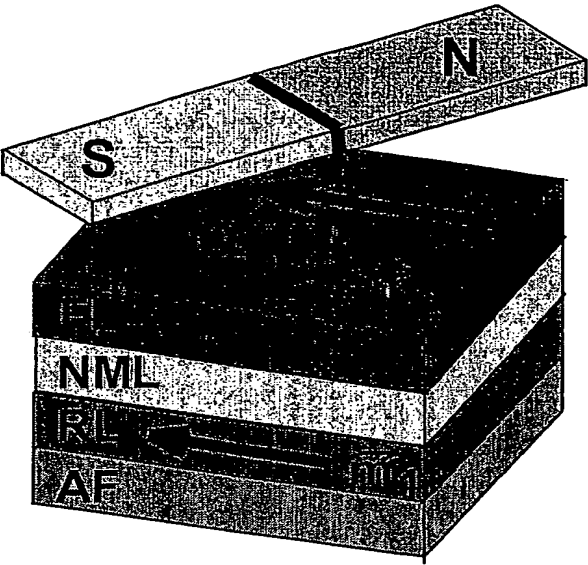


Fig. 1a

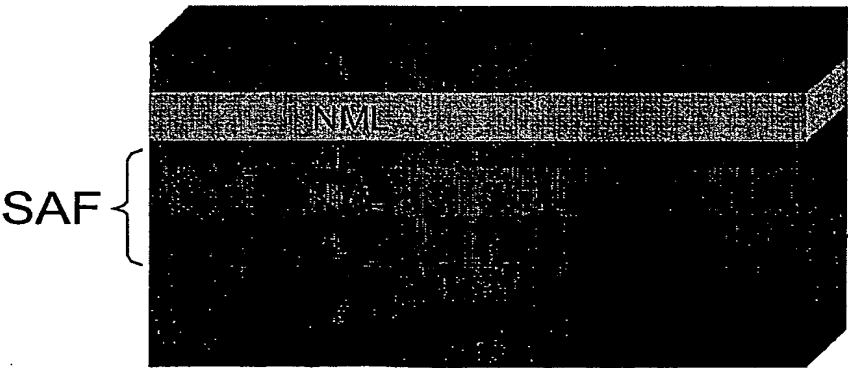


Fig. 1b

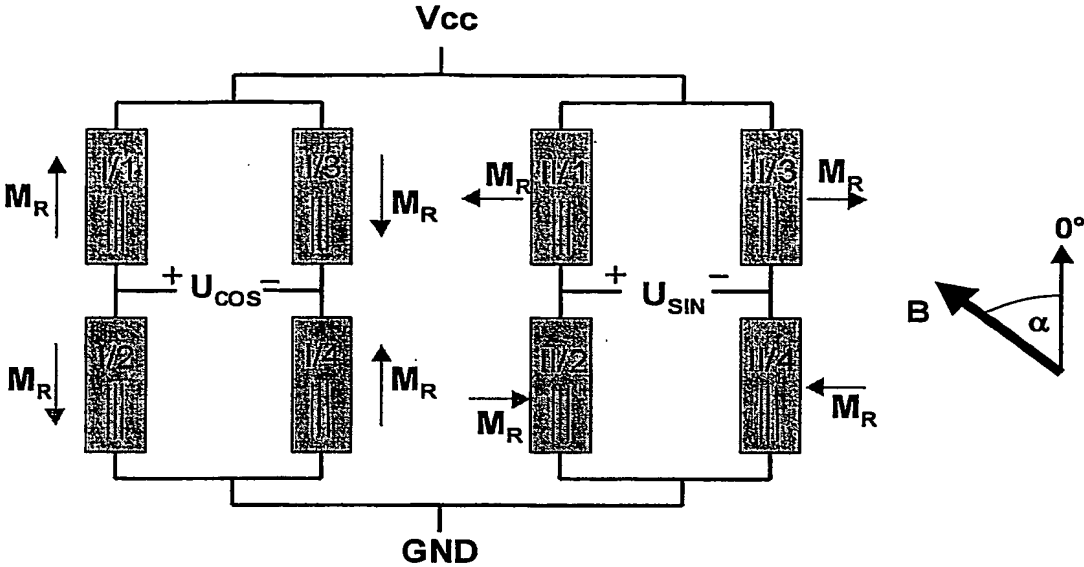


Fig. 2

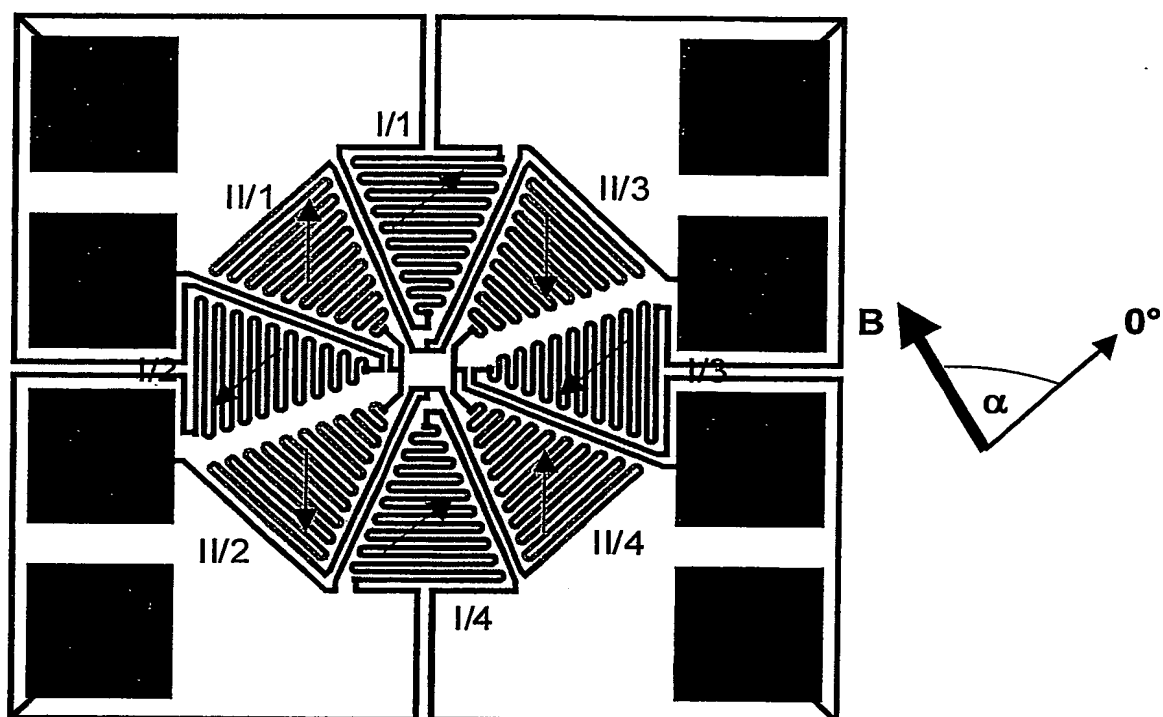
$3/8$ 

Fig. 3

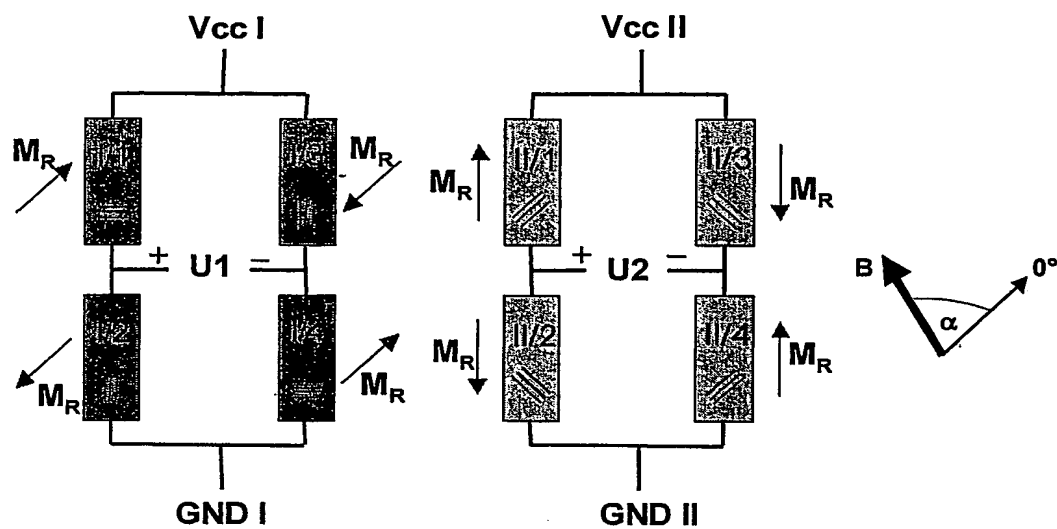


Fig. 4

5/8

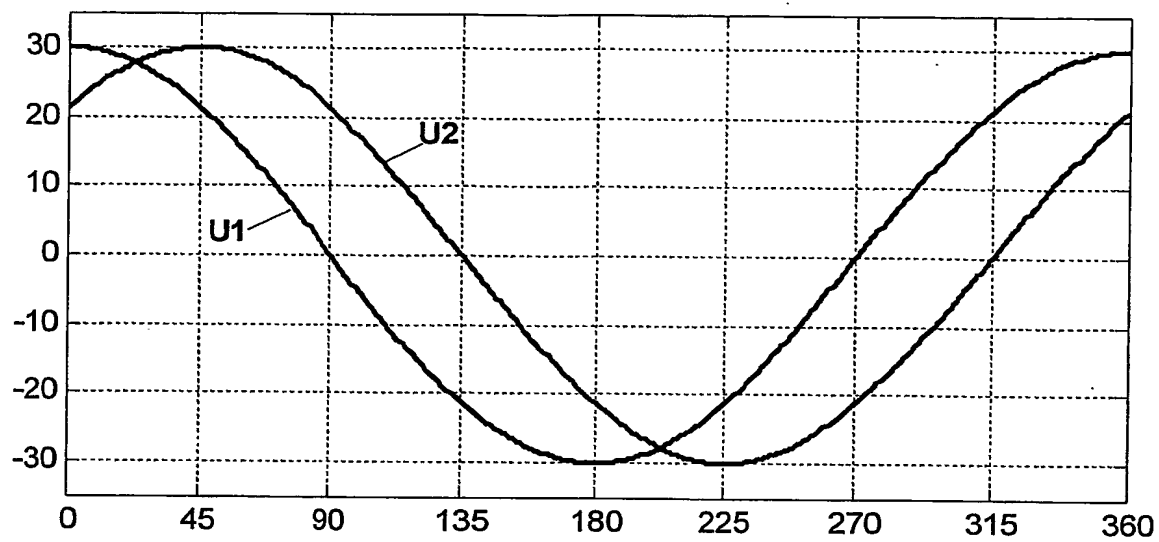


Fig. 5a

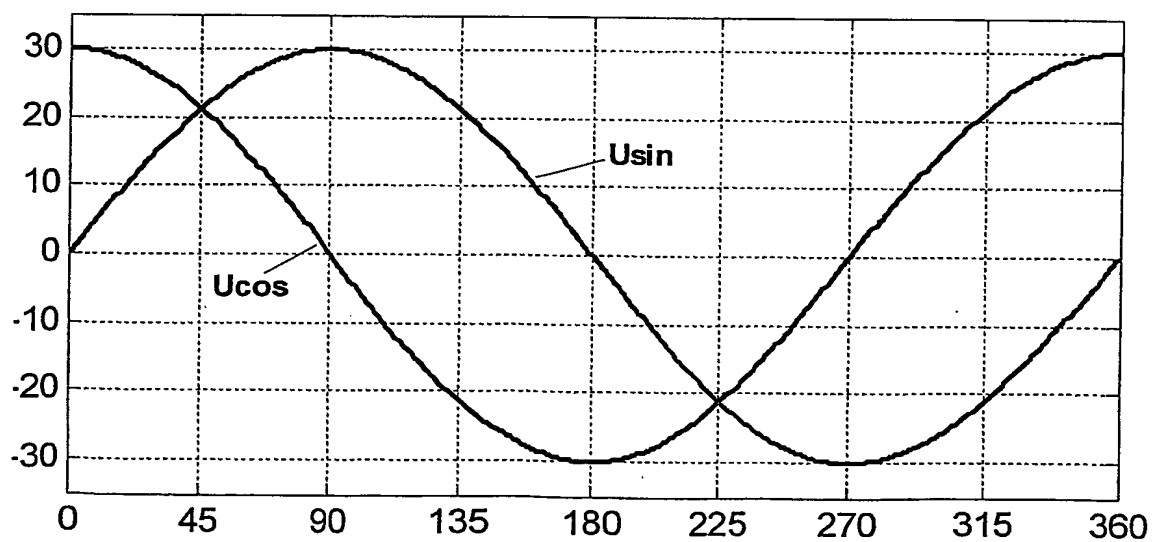


Fig. 5b

6/8

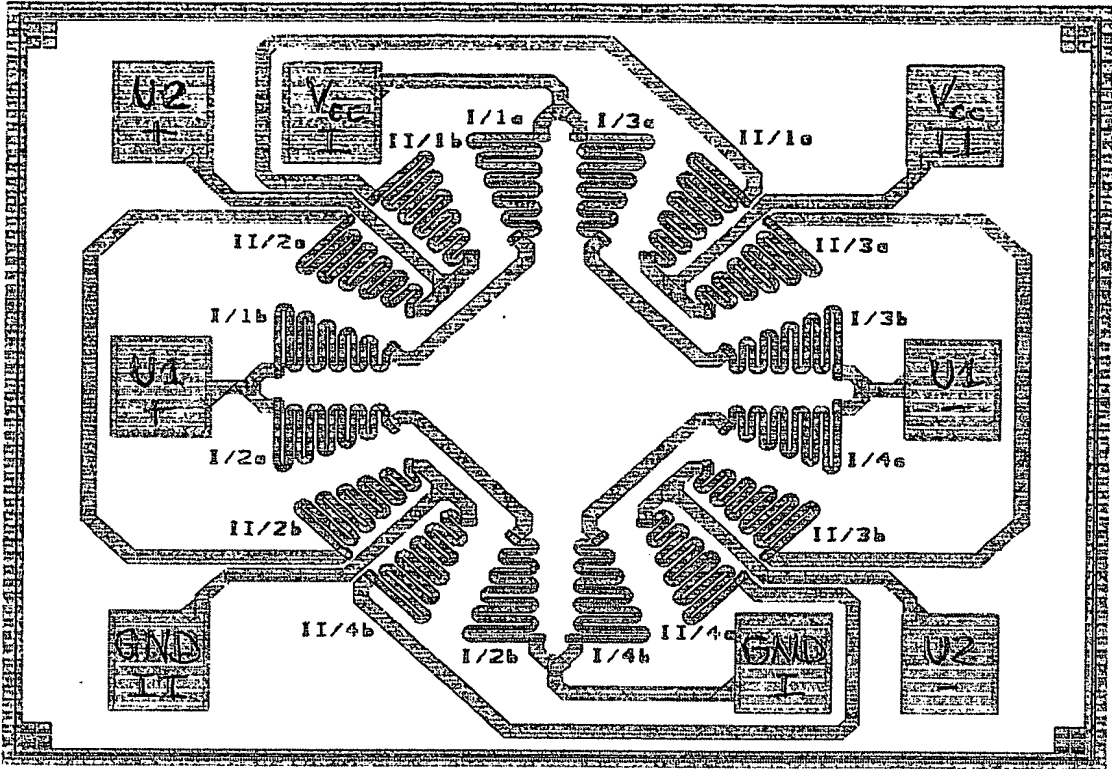


Fig. 6

7/8

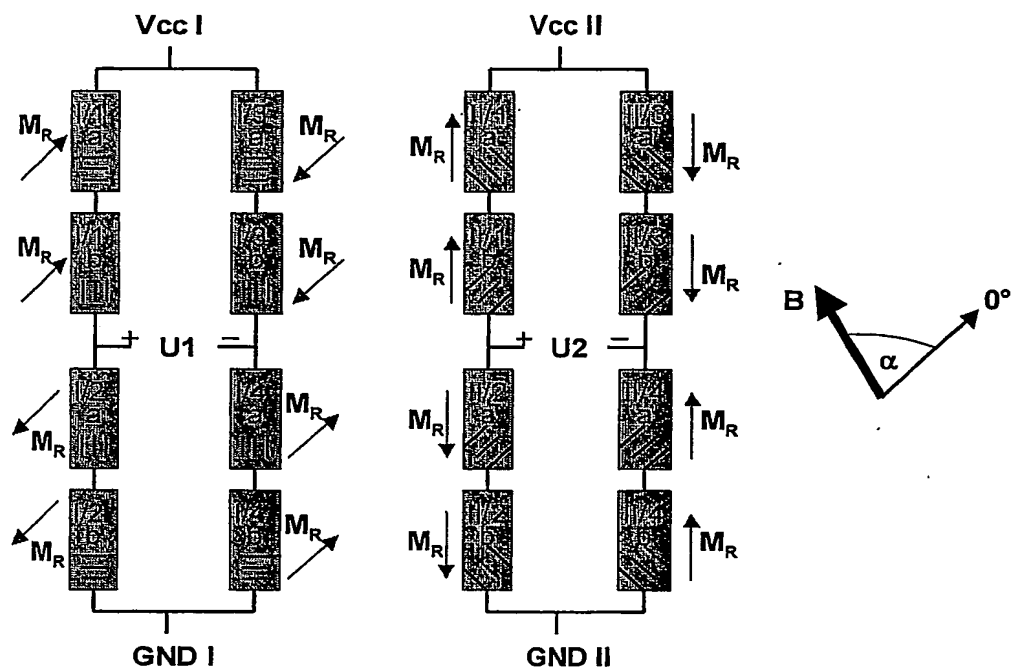


Fig. 7

8/8

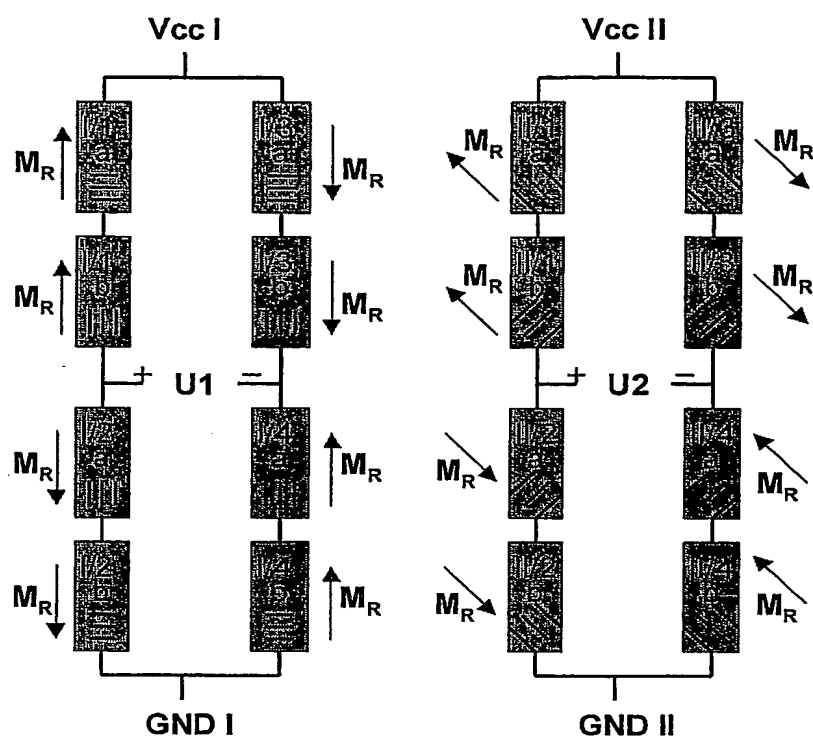


Fig. 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.
PCT/02 03/02145

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G01R33/09 G01B7/30

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 G01R G01B G01D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P,X	US 2002/149358 A1 (DOESCHER MICHAEL) 17 October 2002 (2002-10-17) page 1, paragraph 5 column 3, paragraph 48 figure 2	1-3,5,6
Y	US 5 602 471 A (GRAEGER VOLKER DR ET AL) 11 February 1997 (1997-02-11) column 3, line 3 - line 21 claim 1	1-3,5,6, 8
Y	US 2002/006017 A1 (ADELERHOF DERK JAN) 17 January 2002 (2002-01-17) page 3, paragraph 41	1-3,5,6
Y	US 6 373 247 B1 (FREITAG MARTIN ET AL) 16 April 2002 (2002-04-16) column 1, line 10 - column 2, line 8	8
	-/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *G* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

21 October 2003

Date of mailing of the international search report

29/10/2003

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Swartjes, H.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/93/02145

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 197 22 834 A (INST MIKROSTRUKTURTECHNOLOGIE) 3 December 1998 (1998-12-03) column 2, line 62 - column 3, line 11 -----	4
A	DE 43 17 512 A (UNIV SCHILLER JENA) 1 December 1994 (1994-12-01) column 3, line 50 - line 68 -----	1-3,6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/03/02145

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
US 2002149358	A1	17-10-2002	DE	10118650 A1	17-10-2002
			EP	1249686 A2	16-10-2002
			JP	2003004480 A	08-01-2003
US 5602471	A	11-02-1997	DE	4408078 A1	14-09-1995
			DE	59509790 D1	13-12-2001
			EP	0671605 A2	13-09-1995
			JP	7260414 A	13-10-1995
US 2002006017	A1	17-01-2002	CN	1388901 T	01-01-2003
			WO	0206845 A1	24-01-2002
			EP	1232400 A1	21-08-2002
US 6373247	B1	16-04-2002	DE	19843348 A1	23-03-2000
			AU	759610 B2	17-04-2003
			AU	5151699 A	10-04-2000
			WO	0017667 A1	30-03-2000
			EP	1046047 A1	25-10-2000
			JP	2002525610 T	13-08-2002
			TW	440704 B	16-06-2001
DE 19722834	A	03-12-1998	DE	19722834 A1	03-12-1998
DE 4317512	A	01-12-1994	DE	4317512 A1	01-12-1994

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/03/02145

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 G01R33/09 G01B7/30

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 G01R G01B G01D

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, INSPEC, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
P,X	US 2002/149358 A1 (DOESCHER MICHAEL) 17. Oktober 2002 (2002-10-17) Seite 1, Absatz 5 Spalte 3, Absatz 48 Abbildung 2	1-3,5,6
Y	US 5 602 471 A (GRAEGER VOLKER DR ET AL) 11. Februar 1997 (1997-02-11) Spalte 3, Zeile 3 - Zeile 21 Anspruch 1	1-3,5,6, 8
Y	US 2002/006017 A1 (ADELERHOF DERK JAN) 17. Januar 2002 (2002-01-17) Seite 3, Absatz 41	1-3,5,6
Y	US 6 373 247 B1 (FREITAG MARTIN ET AL) 16. April 2002 (2002-04-16) Spalte 1, Zeile 10 - Spalte 2, Zeile 8	8
	----- -/-	

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- *A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- *E* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- *L* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- *O* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- *P* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

Z Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

21. Oktober 2003

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

29/10/2003

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Swartjes, H.

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PC 03/02145

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie°	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 197 22 834 A (INST MIKROSTRUKTURTECHNOLOGIE) 3. Dezember 1998 (1998-12-03) Spalte 2, Zeile 62 - Spalte 3, Zeile 11 -----	4
A	DE 43 17 512 A (UNIV SCHILLER JENA) 1. Dezember 1994 (1994-12-01) Spalte 3, Zeile 50 - Zeile 68 -----	1-3,6

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

 Internationales Aktenzeichen
 PCT/02 03/02145

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie		Datum der Veröffentlichung
US 2002149358	A1	17-10-2002	DE	10118650 A1	17-10-2002
			EP	1249686 A2	16-10-2002
			JP	2003004480 A	08-01-2003
US 5602471	A	11-02-1997	DE	4408078 A1	14-09-1995
			DE	59509790 D1	13-12-2001
			EP	0671605 A2	13-09-1995
			JP	7260414 A	13-10-1995
US 2002006017	A1	17-01-2002	CN	1388901 T	01-01-2003
			WO	0206845 A1	24-01-2002
			EP	1232400 A1	21-08-2002
US 6373247	B1	16-04-2002	DE	19843348 A1	23-03-2000
			AU	759610 B2	17-04-2003
			AU	5151699 A	10-04-2000
			WO	0017667 A1	30-03-2000
			EP	1046047 A1	25-10-2000
			JP	2002525610 T	13-08-2002
			TW	440704 B	16-06-2001
DE 19722834	A	03-12-1998	DE	19722834 A1	03-12-1998
DE 4317512	A	01-12-1994	DE	4317512 A1	01-12-1994